

**Особенности проектирования оснований, фундаментов и конструкций подземных частей высотных зданий и сооружений.**

**Разводовский Д.Е., Федоровский В.Г., Шейнин В.И., Колыбин И.В. (НИИОСП)**

История устройства фундаментов под небоскребы и высотные здания насчитывает более 100 лет. Первые небоскребы в Нью-Йорке и Чикаго опирались на скальный грунт, но проектирование и устройство их фундаментов уже являлось достаточно сложной инженерной задачей. Впоследствии происходил переход на более проблемные в инженерном отношении территории. Задачи, стоящие перед инженерами-геотехниками, значительно усложнялись. Сейчас строительство небоскребов ведется в таких грунтовых условиях, в которых еще несколько десятилетий назад это казалось невозможным. Осваиваются даже территории, сложенные слабыми и намывными грунтами, строительство ведется на площадках, имеющих карстовую опасность. Небоскребы строятся в зонах 8-9 бальной сейсмичности. Для всех этих сложных условий геотехники успешно решают стоящие перед ними задачи, а арсенал приемов специалиста, занимающегося проектированием фундаментов, постоянно расширяется.

История Российского фундаментостроения под высотные здания началась в послевоенные годы. 13 января 1947 года в Кремле И.В. Сталиным было подписано постановление о строительстве в городе Москве восьми многоэтажных зданий, семь из которых было впоследствии возведено. Строительство высотных зданий было приурочено к юбилейной дате – в сентябре 1947 года Москве исполнялось 800 лет. Возведение первых высоток ознаменовало качественно новый этап развития советского градостроительства, зодчества и отечественного фундаментостроения. Оно было основано на достижениях метростроителей, обладавших большим количеством прогрессивных строительных технологий. Технические особенности указанных строительных работ нашли отражение во множестве книг и статей. Так, в книге А.Н. Комаровского «Записки строителя» автор подробно описывает устройство фундаментов здания МГУ. Котлован выполнялся в естественных откосах, его средняя глубина его составляла 14,5 м. Научное сопровождение работ по устройству котлована осуществлял профессор Владислав Карлович Дмоховский. Глубина заложения фундаментов здания была принята таким образом, чтобы вес здания не превышал вес вынутого грунта в его подземной части. Различные инновационные для своего времени технологии применялись и при устройстве фундаментов других высоток. При строительстве высотного здания на Дорогомиловской набережной было применено

строительное водопонижение с помощью иглофильтров. При строительстве высотного здания на Лермонтовской площади применялось искусственное замораживание грунтов. Примеры применения указанных технических приемов в то время показаны на рис. 1 и 2.



Рис 1. Выполнение водопонижения с помощью иглофильтров.

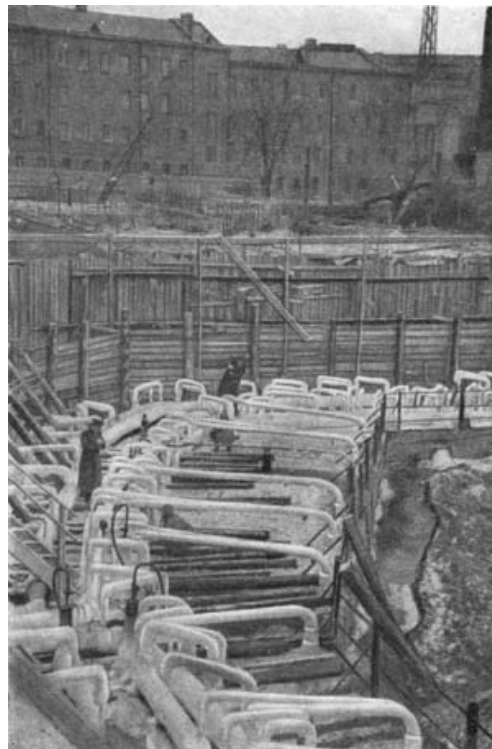


Рис 2. Охлаждающий контур для заморозки грунтов.

В настоящий момент в РФ устройство и проектирование высотных зданий имеет более чем 50-ти летнюю историю, но до сих пор по многим своим положениям остается уникальным. В Градостроительном кодексе в п.п. 4.8 содержится упоминание, что объекты капитального строительства высотой более чем 100 метров, являются уникальными, что в полной мере относится и к фундаментам таких зданий. При проектировании конструкций и фундаментов высотных зданий в большинстве случаев применяются нестандартные методы расчета с учетом физически или геометрически нелинейных свойств, либо разрабатываются специальные методы расчета, что также делает проектирование нестандартной процедурой. В соответствии с постановлением Правительства Российской Федерации № 87 от 16 февраля 2008 г. и приказом Минрегиона России № 36 от 1 апреля 2008 г. при проектировании высотных зданий необходимо выполнить разработку специальных технических условий, включающих дополнительные требования по проектированию фундаментов.

Весь комплекс работ по инженерным изысканиям, проектированию и строительству каждого конкретного высотного здания требует особого, самостоятельного расчетного и конструктивного обоснования. Высотные здания по архитектурно-планировочным соображениям проектируются как сооружения башенного типа, вес которых составляет порядка сотен тысяч тонн. Высота современных высотных зданий обычно значительно превышает горизонтальные размеры, при этом часто не существует возможности распределить нагрузку от надземной части высотного здания на большой площади. Для высотных зданий вклад ветровой нагрузки, которую воспринимает основание, значительно больше чем для обычных многоэтажных домов. Удельное давление на основание под фундаментной конструкцией ряда возведенных и эксплуатируемых высотных зданий достигает величин 500 – 800 кПа. При этом архитектурные особенности высотных зданий могут вызывать значительный эксцентриситет при передаче нагрузок на основание. Пространственная неоднородность грунтов основания, изменение гидрогеологических условий в основании вследствие барражного эффекта, вызванного устройством подземной части зданий, асимметрия поля напряжений в основании, возможная при передаче на него нагрузок от фундаментов – все это усугубляет опасность возникновения кренов зданий вплоть до потери ими устойчивости, делая проектирование фундаментов под высотные здания крайне сложным и ответственным процессом.

Высотные здания вовлекают в работу большой массив примыкающего грунта, обладающий, как правило, существенной неоднородностью в плане и по глубине. Неравномерность передачи нагрузок, неоднородность напластования грунтов и повышенная их деформируемость при недостаточно эффективных проектных решениях могут привести к развитию чрезмерных осадок, прогибов и кренов фундаментных частей зданий, и, как следствие, к развитию недопустимых усилий в конструкциях, а также к дополнительному отклонению верха здания от вертикальной оси. В идеале, еще на самых ранних стадиях проектирования, архитектор должен учитывать геологическое строение территории, где намечено строительство. Однако, в большинстве случаев, в ходе конкурсов обсуждается только включение здания в архитектурный ландшафт, конструктивные и геотехнические проблемы при этом игнорируются. Последнее обстоятельство часто приводит к появлению сложных конструктивных проблем и, как следствие, к значительному удорожанию строительства. Во многих случаях необоснованное смещение центра тяжести здания может привести к неравномерности деформаций основания, что вызывает значительные усилия в основных конструктивных элементах здания. Всегда следует помнить, что отклонения и крены высотных зданий не желательны не только по эстетическим соображениям, но и по требованиям обеспечения нормальной эксплуатации лифтов и другого технологического оборудования. Проблемы могли бы быть значительно меньшими, если бы конструктор на ранней стадии проектирования мог предложить изменения в компоновке здания, которые бы «обыгрывались» архитекторами.

При строительстве высотного здания развиваются существенно большие, чем при строительстве обычных сооружений, зоны деформаций грунтового массива вне пятна здания. Это, вместе с увеличенными значениями напряжений в массиве грунта, может приводить, в частности, к тому, что осадки высотных зданий стабилизируются относительно медленнее и достигают конечных значений за более длительные интервалы времени, чем для обычных зданий. Зона влияния высотного строительства больше, чем для малоэтажных зданий, поскольку в прилегающем грунтовом массиве суммируется эффект от устройства подземной части с последствиями приложения к основанию значительных по величине нагрузок. Увеличение размеров зоны влияния следует обязательно учитывать при проектировании защитных мероприятий для сооружений, примыкающих к высотному зданию.

Степень ответственности выбора проектных решений нулевого цикла при строительстве высотных зданий выше, чем для обычных сооружений, т.к. исправление допущенных геотехнических ошибок в процессе строительства для таких зданий значительно сложнее и дороже, чем в случае рядовых зданий, а в особо сложных условиях такие исправления могут оказаться невозможными.

При проектировании оснований и фундаментов высотных зданий приходится принимать различные «идущие в запас» дополнительные положения, которые должны компенсировать недостаточную полноту знаний о многих факторах, влияющих на условия работы оснований таких зданий. Ряд из таких положений приведен в МДС 50-1.2007 «Проектирование и устройство оснований, фундаментов и подземных частей многофункциональных высотных зданий и комплексов». В частности, там содержится требование, что расчет оснований высотных зданий по предельным состояниям второй группы (по деформациям) следует проводить на основное сочетание нагрузок, при этом деформационные характеристики грунтов основания принимаются с коэффициентом условий работы  $\gamma_c = 0,9$ . Расчетные значения прочностных характеристик грунтов при расчетах высотных зданий по второй группе предельных состояний должны приниматься «с обеспеченностью» 0,95, что идет в запас по сравнению с требованиями СНиП 2.02.01-83\* «Основания зданий и сооружений». Условность таких предложений очевидна, они становятся актуальными при проведении расчетов с использованием действующих нормативных методик при недостаточной изученности свойств грунтов. При проведении детальных инженерно-геологических исследований и последующем проведении расчетов с применением специализированных геотехнических программ, использующих зависимости нелинейной механики грунтов, необходимость введения в расчеты дополнительных допущений может отпасть.

При проектировании фундаментов высотных зданий можно выделить несколько основных этапов. На первом этапе выбирается тип фундамента, его основные технические характеристики. Это крайне важный и сложный процесс, определяющий технико-экономические показатели всего будущего строительства. На указанном этапе должны формулироваться дополнительные требования к инженерно-геологическим изысканиям, выбираться способы и методы последующих расчетов фундаментов. Для свайных фундаментов определяется тип и длина свай, формулируются требования по проведению испытаний свай. На втором этапе проводятся расчеты осадок фундаментов, назначается рабочее армирование основных элементов фундаментных конструкций. На основании

расчетов в конструктивную схему здания могут вноситься незначительные изменения. Часто возникает необходимость в корректировке не только основных геометрических размеров проектируемых конструктивных элементов, но и в ведении в конструктивную схему здания дополнительных стен и колонн. На третьем этапе ведется разработка конструктивных чертежей фундаментов здания. Конструктором разрабатываются технические решения по установке дополнительной технологической арматуры. Указанные чертежи увязываются с проектом мониторинга, проектом производства работ. Далее более подробно опишем эти этапы.

### **Выбор типа фундамента высотного здания**

Выбор типа фундаментов высотных зданий определяется, в основном, конструкцией здания и грунтовыми условиями, хотя иногда определяющим становятся не технические факторы, а предпочтения Заказчика. Известны случаи, когда применение свайных фундаментов бывает вызвано только необходимостью обеспечения соответствия требованиям элитной недвижимости, поскольку свайные фундаменты кажутся страховым компаниям более надежными, чем фундаменты на естественном основании.

Перед проектировщиком в первую очередь всегда стоит задача выбора рационального типа фундамента, обеспечивающего условия прочности и нормального функционирования возводимого здания. При благоприятных инженерно-геологических условиях бывает возможность устройства фундаментов в виде отдельных опор под колонны или в виде монолитных железобетонных фундаментных плит. В остальных случаях применяются плитно-свайные и свайные фундаменты. При наличии стилобатных частей у возводимых зданий возможны комбинации различных технических решений по устройству фундаментов, когда фундаменты различных типов разделяются деформационными швами.

Возможность устройства фундаментов в виде монолитной железобетонной плиты обычно рассматривается проектировщиками в самом начале работы над проектом. Как известно, плитные фундаменты бывают двух типов: в виде сплошной железобетонной конструкции и коробчатые, когда верхняя и нижняя плита разделены между собой системой диафрагм. Коробчатые фундаменты применялись еще в «сталинских» высотках. Такой тип фундаментов при малой материалоемкости обладает высокой изгибной жесткостью, что необходимо для выравнивания осадок. Современный пример применения такой конструкции – высотный дом «Эдельвейс» на Кутузовском проспекте в Москве (проектирующая организация – ЦНИИЭПжилища (рис.3.)).



Рис 3. Жилой комплекс «Эдельвейс»

В принципе, возможно совмещение функций коробчатого фундамента и подземной автостоянки, что может резко повысить привлекательность такого рода решения фундамента, но возникающая в этом случае система продольных и поперечных стен снижает возможности архитектора и часто оказывается неприменимой. Возможность применения плитных фундаментов для высотных зданий определяется расчетной величиной осадки и ее неравномерности, величинами усилий в фундаментных конструкциях. Если расчетные величины деформаций и внутренних усилий конструкций возводимого здания находятся в допустимых пределах, то этот вариант в большинстве случаев может быть принят для дальнейшей проработки. Если же проектные требования по усилиям и деформациям не могут быть обеспечены, возникает необходимость локального ужесточения основания, устройства консольных выпусков, изменения конструктивной схемы здания с устройством дополнительных деформационных швов. Если же указанными приемами не удастся достичь желаемого результата, то проектировщик переходит к проектированию фундаментов глубокого заложения: свайных и в виде баррет. Для зданий существенно переменной этажности, например, высотного здания с пристроенной подземной автостоянкой, использование свай или глубоких опор под высотной частью часто бывает вызвано необходимостью избежать возможных неравномерных осадок и связанных с ними усилий в надземных и фундаментных конструкциях. Альтернативой здесь может служить только использование

адекватной последовательности строительства – сначала возводится высотный корпус, а затем, когда основные осадки реализуются, пристроенная подземная или малоэтажная часть. Возможность такого технического решения должна проверяться расчетом основания по I группе предельных состояний, чтобы не допускать выпор грунта из-под подошвы фундамента.

Применение свайных фундаментов часто диктуется выбранной конструкцией подземной части возводимого здания. Применение ограждающей котлован «стены в грунте» в качестве несущей (фундаментной) конструкции может вызывать необходимость устройства фундаментов глубокого заложения и внутри контура возводимого здания. Это связано с тем, что расчетные величины осадок «стены в грунте» значительно меньше чем, например, плитных фундаментов. И если площадь застройки велика, а нагрузки значительны, при использовании в качестве фундамента плиты на естественном основании могут возникнуть значительные прогибы как самой плиты, так и надфундаментной конструкции. Опираение плиты на сваи или глубокие опоры обычно позволяет решить эту проблему.

Другим примером применения свайных фундаментов являются случаи, когда грунты площадки строительства обладают довольно высокими деформационными и прочностными характеристиками, но здание передает нагрузку на плиту по малой площади (стены ядра жесткости, отдельные сильно нагруженные колонны), а возможность увеличения опорной площади фундаментов отсутствует. Применение свай или глубоких опор непосредственно под тяжело нагруженными вертикальными несущими конструкциями в этом случае может позволить обеспечить нормальное функционирование возводимого здания.

Часто бывает целесообразно использовать сваи не только в виде полей с постоянным в плане шагом. Эффективным с инженерной точки зрения решением может оказаться сгущение шага свай под колоннами, стенами и ядрами жесткости возводимых многоэтажных зданий. Такой инженерный прием повышает эффективность работы свай и улучшает условия работы плиты и надфундаментной конструкции. В принципе, имеется техническая возможность регулировать жесткостные характеристики основания и за счет изменения длины свай. Такой прием в отдельных случаях используется за границей, в частности, в Германии. Тормозит применение этого способа устройства свайных фундаментов под высотные здания, в основном, отсутствие достоверных методов расчета свайных фундаментов из свай переменной длины.



В силу особенностей работы свай в составе больших групп (концентрации отпора в нижней части ствола, что характерно еще для свай-стоек, опирающихся на скальный грунт) важную роль начинает играть не столько несущая способность свай по грунту, сколько их несущая способность по материалу ствола. В связи с этим для высотных зданий нецелесообразно использовать сваи малого диаметра, в том числе буроинъекционные сваи различного типа. Напротив, сваи большого диаметра и глубокие опоры типа баррет представляются гораздо более надежным техническим решением, поскольку при больших геометрических размерах проще обеспечить проектные требования к материалу ствола свай и необходимую величину защитного слоя рабочей арматуры.

Очевидно, что при высотном строительстве должны быть введены дополнительные требования не только к проектированию, но и к организации, технологии возведения и приемке работ по устройству оснований, фундаментов и подземных частей. При этом отдельные требования заранее могут быть сформулированы в специальных технических условиях, другие могут стать понятными в ходе научного сопровождения, которое часто сопутствует проектированию фундаментов и других конструкций высотных зданий.

Выбор конструкции фундамента высотного здания должен осуществляться не только на основании технико-экономического сравнения нескольких вариантов, а с учетом требований обеспечения безопасной и эффективной эксплуатации здания. Кажущаяся экономия при принятии технических решений может привести к многомиллионным затратам в дальнейшем. При этом всегда следует помнить, что при проектировании высотных зданий выбор типа фундаментов это только первый шаг в создании надежной и безопасной конструкции. Только качественные расчеты и глубокая проработка технических решений позволят создать действительно безопасную конструкцию.

### **Расчеты при проектировании фундаментов высотных зданий**

Характерной особенностью в проектировании фундаментов высотных зданий является тот факт, что ключевая роль в принятии технических решений отводится определению осадок, т.е. расчету по 2-му предельному состоянию. Прочностной расчет (по 1-му предельному состоянию) играет лишь вспомогательную роль при проектировании фундаментных конструкций и иных конструкций «нулевого»-цикла высотных зданий. При проектировании высотных зданий возникает задача определения

несущей способности свайных фундаментов по грунту (в том числе при устройстве подземной части методом «сверху-вниз»), выполняется прочностной расчет при проектировании ограждений котлованов. Также может возникать задача о локальном выпоре грунта из-под фундаментов в том случае, если стилобатная часть возводится после строительства высотной части здания в откопанном котловане (рис. 4). Несомненно, все расчеты по первому предельному состоянию должны выполняться, но говорить об их уникальности или чрезмерной сложности при проектировании фундаментов и подземных частей высотных зданий не приходится.

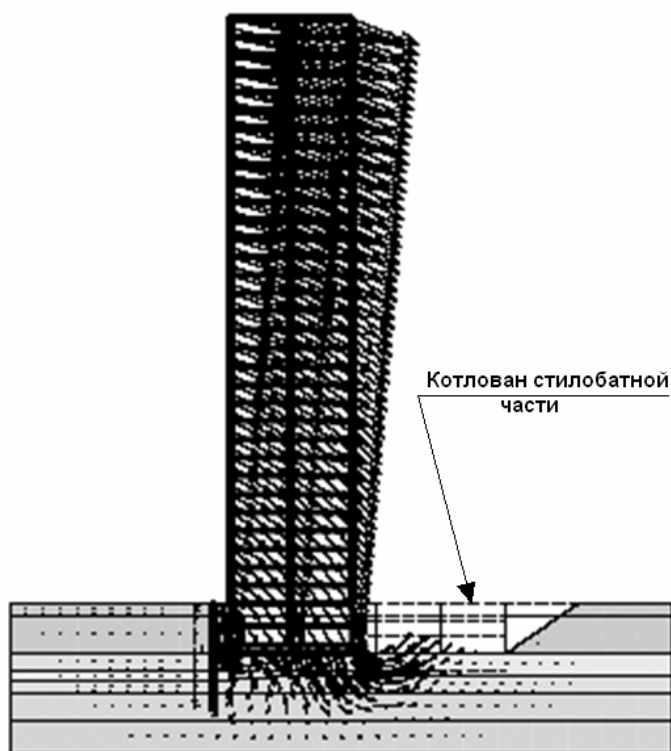


Рис. 4. Механизм локального выпора из-под фундаментной плиты.

Итак, для высотного строительства точность расчета осадок фундаментов становится приоритетной задачей, в конечном счете определяющей большинство конструктивных решений всего высотного здания. В этом случае использование для расчета осадок традиционных подходов, представленных в нормативных документах и коммерческих конечно-элементных программах и основанных на зависимостях теории упругости, во многих случаях, особенно с повышением этажности, не дает удовлетворительных результатов. Расчетная величина осадки может оказаться заниженной. Это может быть связано с большим количеством факторов. Проектировщиками часто не учитываются пластические свойства грунтов основания, их

возможное разуплотнение в ходе экскавации котлована. Учет заглубления фундаментов не всегда сопровождается адекватными расчетами. Зачастую не учитывается изменение уровня грунтовых вод в процессе экскавации котлована, наличие ограждающих конструкций котлована, барражный эффект и т. д. Решения принимаются на основании определения средней величины осадки по усредненному инженерно-геологическому разрезу, не учитывается плановая неоднородность в инженерно-геологическом строении. Не адекватно описывается механическая работа фундаментов в краевых областях, особенно при наличии ограждающей конструкции котлована. Если при проектировании фундаментов многоэтажных зданий высотой до 75 метров неточности в определении осадок часто не имеют существенного значения, то при проектировании высотных зданий более 100 м, они могут приводить к существенным проблемам. Всегда следует учитывать, что правильно проведенный расчет позволит принять наиболее экономически обоснованное решение, а в ряде случаев отказаться от применения дорогостоящих свайных фундаментов. Это означает, что при проведении расчетов фундаментов высотных зданий, параллельная работа нескольких групп расчетчиков становится технически и экономически оправданной.

Точность прогноза осадок высотных зданий может быть существенно повышена если в расчете будут учтены все стадии формирования напряженно-деформированного состояния грунтового массива на котором возводится здание. При задании начального напряженно-деформированного состояния грунтового массива следует учитывать не только собственный вес грунтов, наличие грунтовых вод (напорных и безнапорных), но и, вообще говоря, историю формирования напряженно-деформированного состояния грунтового массива, в расчетной модели необходимо учитывать влияние существующих соседних зданий и сооружений. Проектировщику также следует принимать во внимание, что при строительстве на глинистых грунтах подъем дна котлована может быть растянут во времени и не завершиться к началу возведения не только фундаментных, но и значительного количества надземных этажей здания. В начальный этап строительства при возведении 10-ти и более этажей здания осадки могут быть крайне малы или вообще не фиксироваться. На самом же деле осадки просто отложены во времени и могут происходить в течении длительного периода после окончания строительства. Такой эффект может оказываться достаточно важным при назначении армирования перекрытий возводимого многоэтажного здания, а в процессе эксплуатации может возникать разгерметизация стеклопакетов, установленных в окнах здания.

В действующих нормах СП 50-101-2004 «Проектирование и устройство оснований и фундаментов зданий и сооружений» приводится метод расчета осадок с учетом экскавации котлована, учитывающий разгрузку основания, который в принципе может быть использован в качестве первой оценки при определении осадки фундаментов высотных зданий. Однако, всегда следует учитывать, что для сооружений I уровня ответственности, к которым и относятся высотные здания, величины модуля деформации по ветви первичного нагружения  $E_{i,}$  и вторичного нагружения  $E_{e,i}$  для всех инженерно-геологических элементов основания необходимо в обязательном порядке определять по результатам испытаний, в то время как для сооружений II и III уровней ответственности допускается принимать  $E_{e,i} = 5E_{i,}$ . Необходимо также оценить возможное разуплотнение грунтов основания, адекватно определить основные показатели прочностных характеристик грунтов. В связи с изложенным можно отметить, что точность методов расчета оснований, в том числе и высотных зданий, не может существенно опережать уровень разработки моделей грунтов и методов определения их физико-механических характеристик (параметров этих моделей). Поэтому следует обратить особое внимание на совершенствование способа отбора образцов грунта, лабораторных и особенно полевых испытаний грунтов (штампы, прессиометрия, статическое и динамическое зондирование, крыльчатка, геофизические методы).

Все сказанное выше можно отнести и к определению осадки свайных фундаментов, при проведении расчетов которых также может возникать большое количество проблем. Для свайных фундаментов сложности с проведением расчетов связаны не только с назначением механических свойств грунтов, но и с адекватным выбором расчетной модели. Большеразмерные свайные фундаменты, как известно, подразделяются на две большие группы - классический вариант сплошного свайного поля и плитно-свайные фундаменты. В принципе, хотя для определения осадок и усилий в сваях существуют нормативные методы, отраженные в действующей нормативной литературе, для высотного строительства погрешность таких расчетов может оказаться чрезмерной. Существующая расчетная схема для определения осадок в виде условного фундамента, который часто называют «чемоданом со сваями», позволяет определить только среднюю осадку фундаментов. В рамках указанной расчетной схемы невозможно учесть ни фактическую жесткость надземных конструкций, ни плановую неоднородность в приложении нагрузок. Указанная схема не позволяет проводить расчеты для свай переменной длины. Существующие сейчас методы расчета и проектирования плитно-

свайных фундаментов также нуждаются в дальнейшем развитии и уточнении. Инженерные способы расчета плитно-свайных фундаментов, включая осадку оснований, не в полной мере учитывают все те процессы, которые развиваются в этой сложной конструкции, взаимодействующей с грунтом. При использовании инженерных методов расчета, основанных на частных решениях для одиночных свай, возникает слишком большая погрешность, поскольку механическая работа свай в составе большеразмерной группы и одиночной сваи существенно отличается. Жесткость сваи в составе комбинированного свайно-плитного фундамента (КСПФ) меньше, чем жесткость одиночной сваи, и, точно так же, жесткость плиты в составе КСПФ меньше жесткости той же плиты без свай. В целом жесткость КСПФ несколько меньше суммы жесткостей свай и плиты порознь, что противоречит рекомендациям МГСН 2.07-01 «Основания, фундаменты и подземные сооружения» и СП 50-102-2003 «Проектирование и устройство свайных фундаментов». Следует, правда, отметить, что в указанных нормах это компенсируется занижением расчетных жесткостей основания как свай, так и, особенно, плиты.

Современная вычислительная техника и пакеты программ, в частности на основе метода конечных элементов (МКЭ), позволяют автоматизировать выполнение всех расчетных операций при проектировании фундаментов высотных зданий. Однако и полностью компьютеризированный подход может наталкиваться на существенные трудности. В частности, не существует общепризнанных (нормативных) моделей деформационного поведения грунтов. Простейшие модели (упругая или упруго-идеальнопластическая среда с условием текучести Кулона-Мора) не описывают чрезвычайно существенных, именно для расчета осадок тяжело нагруженных оснований факторов, таких как различие деформируемости грунта при первичном и повторном нагружении или разгрузке, или зависимость жесткости грунта (как при первичном, так и при повторном нагружении) от его напряженного состояния. Более совершенные модели упруго-пластических сред с деформационным упрочнением, например, модели Cam-Clay, Ю.К.Зарецкого или П.А.Вермеера (последняя модель используется в популярной программе PLAXIS), содержат параметры, не входящие в число определяемых стандартными инженерно- геологическими изысканиями. Кроме того не вполне очевидно, как для таких многопараметрических моделей проводить расчеты по первому и второму предельному состоянию. Исключительно компьютерный расчет в рамках единой расчетной схемы «основание-высотное здание», к которому зачастую сводится

проектирование фундаментов, часто не позволяет проектировщику «прочувствовать» характер поведения основания и оценить надежность и точность полученных результатов. Расчетная схема усложняется, в нее вводятся мелкие детали, расчет ведется по РСУ (расчетным сочетаниям усилий). При таком подходе сама работа конструкции ускользает от инженера, что недопустимо. Только комбинация расчетов по упрощенным схемам с расчетам детальных МКЭ моделей может приводить к принятию надежных конструктивных решений. Путь, когда в начале проектирования создается детальная модель, а какие-либо другие верифицирующие расчеты не ведутся, может приводить к непрогнозируемым последствиям.

Коммерческие конечно-элементные программы, предназначенные для проектирования надземных конструкций зданий, в большинстве случаев не учитывают специфику механической работы свайно-плитных фундаментов. Взаимодействие свайных полей с грунтом качественно отлично от такого же взаимодействия одиночных свай и небольших свайных групп (кустов). Характерное для свайных полей вовлечение в работу всего массива межсвайного грунта приводит к тому, что отпор грунта препятствует смещению свай и концентрируется только в нижней части последних (по острию и в нижней части ствола, характерный размер которой пропорционален шагу свай в поле). Для расчета осадки такого рода свайных фундаментов целесообразно разделить ее на две составляющих: общую осадку «условного» фундамента и локальную осадку отдельных свай в зоне концентрации напряжений под нижними концами свай или в зоне продавливания, как ее называют другие исследователи. Под условным фундаментом понимается сплошной объем, ограниченный с боков периметром свайного поля, а снизу плоскостью или иной гладкой поверхностью, проходящей через концы свай. Жесткость (модуль упругости) условного фундамента в вертикальном направлении принимается равным осредненной жесткости свай и межсвайного грунта на сжатие (вертикально армированное основание), жесткость в прочих направлениях остается равной жесткости грунта, т.е. массив получается конструктивно анизотропным. Его осадка при приложении сверху равномерной нагрузки в силу распределительной способности грунтового основания оказывается неравномерной – в центре больше, по краям меньше, если длина свай постоянна. При определении осадок условного комбинированного фундамента высотных зданий желательно использовать конечноэлементный расчет.

В последнее время достаточно широкое распространение получил метод «ячейки», основанный на предположении, что внутренние сваи большеразмерных полей находятся в

одинаковых условиях, т.е. из всего рассматриваемого массива может быть выделена ячейка, включающая одну сваю и окружающий ее грунт, зависимости для которой позволят описать механическую работу фундаментов. Пример такой расчетной схемы показан на рисунке 5. Указанные расчеты позволяют более обоснованно определить величину дополнительной осадки в зоне нижних концов свай (по отношению к массивному фундаменту). Они могут выполняться с помощью специализированных геотехнических конечноэлементных программ (PLAXIS, Zsoil, Ansys). При таком подходе некоторые сложности возникают при расчете периметральных свай, поскольку для них в виду отсутствия условий симметрии затруднительно выделить объемную цилиндрическую грунтовую ячейку. Здесь возможны как искусственные приемы комбинирования отдельных решений, так и прямой трехмерный расчет МКЭ. С развитием соответствующих программ расчет такого рода вообще может занять основное место в проектной работе, но это перспектива ближайшего будущего.

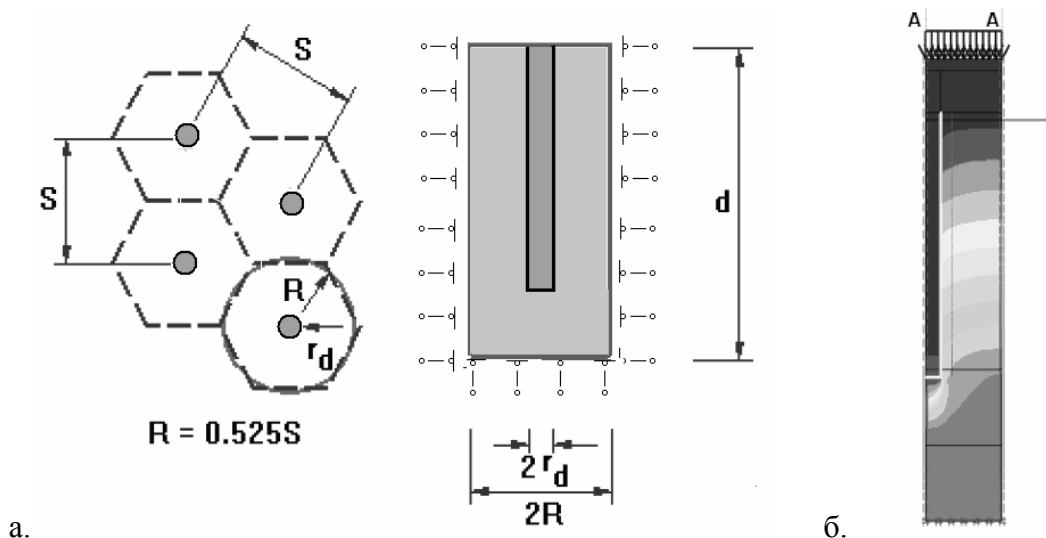


Рис 5. Расчет плитно-свайного фундамента методом «ячейки»  
 а. Расчетная схема; б. Расчет осесимметричной задачи с помощью PLAXIS.

Таким образом, для расчета осадок фундаментов проектировщик должен знать исходное (природное) и начальное (после отрывки котлована) напряженное состояние, уметь определять нагрузки на фундамент, распределение напряжений в грунте от нагрузок, приложенных к фундаменту, вертикальные деформации грунта от этих напряжений, а также уметь суммировать эти деформации по глубине основания в пределах активной (сжимаемой) толщи. Для решения этих задач необходимо выбрать надлежащие расчетные схемы и соответствующее программное обеспечение. Для контроля правильности результатов необходимо предусматривать проведение расчетов

несколькими группами проектировщиков с применением альтернативного программного обеспечения. При этом критерии правильности работы различных расчетных групп должны задаваться заранее.

### **Разработка проектной документации оснований, фундаментов и конструкций подземных частей высотных зданий и сооружений**

Современные объекты высотного строительства, как правило, имеют развитую подземную часть, включающую несколько подземных этажей, что объясняется как привлекательностью размещения в них автомобильных парковок и технических помещений, так и необходимостью устройства фундаментов высотных зданий на как можно более низких отметках для снижения дополнительного давления на основания.

Глубина котлованов высотных зданий обычно составляет не менее 10-15 м, доходя порой до 25-30 м, при этом отметка дна котлована почти во всех случаях находится ниже уровня подземных вод. Разработка котлованов таких глубин в городских условиях невозможна без устройства ограждающих конструкций, в качестве которых при высоких отметках уровня подземных вод (УПВ) используются монолитные или сборно-монолитные траншейные стены, устраиваемые способом «стена в грунте», стены из буросекущихся свай, армированные грунто-цементные стены, выполняемые по Jet-технологии, а также их комбинации. Требования к проектированию ограждающих конструкций котлованов определяются, в основном, не высотой возводимого здания, а глубиной подземной части. В настоящей статье особенности проектирования подземных частей зданий не рассматриваются, они подробно описаны в XII томе РАСЭ.

Строительство подземной части высотных зданий может выполняться в открытом котловане в классической последовательности «снизу-вверх», закрытым способом «top-down» и комбинированным способом «semi top-down». С точки зрения строительства высотного здания, наибольшую сложность может представлять тот случай, когда ограждающие конструкции котлована воспринимают нагрузки от веса здания. При этом для проектирования фундаментов может потребоваться проведение специальных опытно-исследовательских работ.

Окончательный выбор конструктивной схемы ограждений глубоких котлованов высотных зданий и технологической последовательности работ по устройству котлована должен быть взаимно увязан и выполняться, как правило, на основании многовариантных расчетов и технико-экономического сопоставления вариантов. При этом сделанный выбор



не должен препятствовать устройству запроектированных фундаментов и быть увязанным с техническими решениями фундаментов возводимого высотного здания.

Важным моментом в проектировании фундаментов в виде монолитных железобетонных плит или монолитных железобетонных ростверков является требование по обеспечению их качественного изготовления. Такие фундаменты обычно густоармированы, могут иметь многорядное нижнее и верхнее армирование. В проекте «толстых» фундаментных плит и ростверков необходимо запроектировать не только рабочую верхнюю и нижнюю арматуру и поддерживающие каркасы, но и установить дополнительную технологическую арматуру. В рабочем проекте должны содержаться требования к укладываемой бетонной смеси и порядок бетонирования. Эти требования обычно получают дальнейшее развитие в разделе ППР, который должен быть согласован проектной организацией. В особо сложных случаях весь процесс укладки и подготовки бетонной смеси должен курироваться соответствующим научным сопровождением.

При применении толстых фундаментных плит для того, чтобы избежать изотермии при укладке бетона, необходимо предусматривать специальные технические решения по проведению бетонных работ с составлением карт бетонирования. Укладка бетона в монолитные железобетонные фундаментные плиты должна осуществляться при постоянном авторском надзоре.

Другим важным требованием является то, что в рамках проекта мониторинга должны быть предусмотрены специальные мероприятия по определению величины давления, передаваемого на основание, контролю усилий в фундаментных конструкциях. Также должны быть предусмотрены мероприятия по контролю за осадками и кренами возводимого здания.

При проектировании свайных фундаментов особое внимание должно уделяться обеспечению качества выполняемых свай. В проекте обычно выделяются специальные опытно-производственные сваи в которые закладываются трубки для проведения работ по контролю качества выполненных свай, а если сваи воспринимают значительные горизонтальные нагрузки, то в сваи устанавливаются трубки для проведения инклинометрических измерений в ходе испытаний свай на горизонтальную нагрузку. Пример устройства таких свай приведен на рисунке 6. Контроль за качеством бетона может осуществляться ультразвуковым и радио-изотопным методом или выбуриванием керна (рис. 7). Учитывая, что под высотные здания как правило применяются сваи большой длины и диаметром до двух метров и более, в проекте часто требуется

предусмотреть проведение нестандартных статических испытаний с помощью ячейки Loadcell (ячейки Остерберга) или другие не гостированные методы.

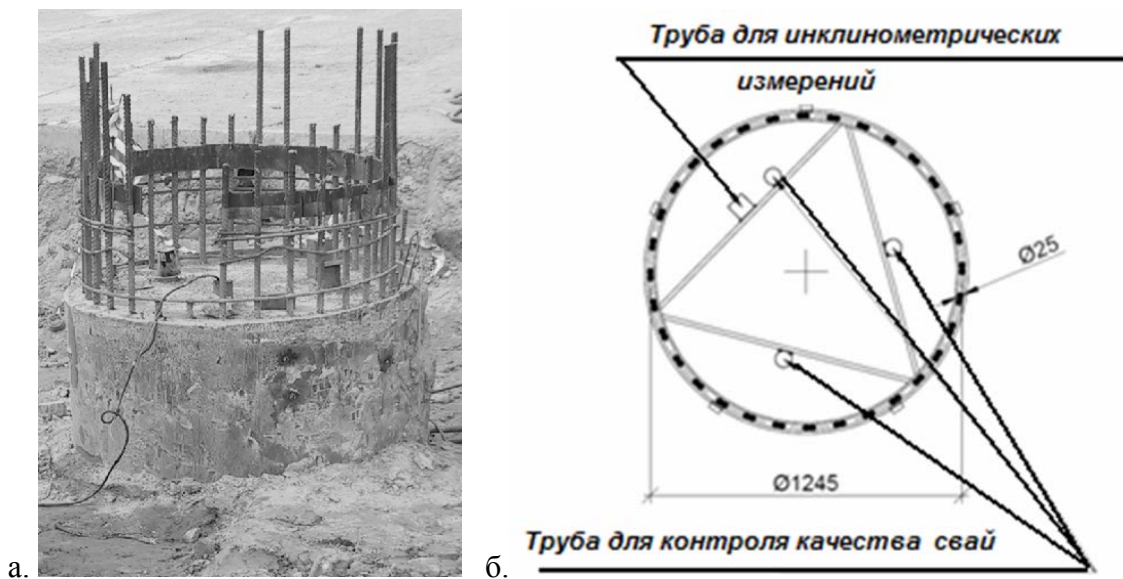


Рис 6. Инструментированная свая.  
а. Вид головы сваи; б. Поперечное сечение сваи.



Рис 7. Визуальное освидетельствование после выбуривания керна из тела сваи.

\* \* \*

Таким образом, процесс проектирования оснований, фундаментов и конструкций подземных частей высотных зданий и сооружений сложен и требует соответствующей квалификации. Зачастую, это труд большой группы специалистов. С развитием геотехнических наук накапливается коллективный опыт, что позволяет инженерам устраивать надежные фундаменты для зданий все большей и большей этажности.

**Литература**

- МГСН 2.07-01. Основания, фундаменты и подземные сооружения. М., 2001
- МГСН 4.19-2005. Временные нормы проектирования многофункциональных жилых зданий и зданий-комплексов в г.Москве. М., 2005
- Общие положения к техническим требованиям по проектированию жилых зданий высотой более 75 метров. М., 2002
- СП 50.101-2004. Проектирование и устройство оснований и фундаментов зданий и сооружений. М., 2005
- СП 50.102-2003. Проектирование и устройство свайных фундаментов. М., 2004
- Петрухин В.П., Колыбин И.В., Шейнин В.И. Геотехнические особенности небоскребов Журнал «Высотные здания», номер 1, 2006 год.
- Разводовский Д.Е, Колыбин И.В., Кисин Б.Ф. Проектирование и расчет подземных сооружений. -Российская архитектурно-строительная энциклопедия. Том XII/ - Строительство подземных сооружений. Москва 2008 год.
- Комаровский А. Н. Записки строителя. - М.: Воениздат, 1972. - 263 с.: ил.
- МДС 50-1.2007 «Проектирование и устройство оснований, фундаментов и подземных частей многофункциональных высотных зданий и зданий-комплексов»